

武汉东湖上覆水和沉积物中磷形态的垂直分布特征

林悦涓¹, 吴 峰¹, 邓南圣¹, 方 涛², 刘建彤²

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079; 2. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 武汉东湖是有代表性的城市浅水型湖泊。于春、夏两季对东湖庙湖湖区的上覆水和沉积物柱状样品进行了磷的形态分析,研究了各种磷形态在上覆水及沉积物垂直方向上的分布特征。结果表明,春夏两季东湖上覆水总磷(TP)含量分别为 1.11 和 1.25 mg·L⁻¹,超过国家标准近 6 倍,富营养化程度严重。春季湖水中磷主要以颗粒态形式存在,夏季主要以溶解态形式存在。春季湖区沉积物中铁结合磷(Fe-P)比例最大,占沉积物 TP 的 44.3%,夏季闭蓄磷(OcP)比例最大,占 TP 的 36.3%,高比例的 Fe-P 从沉积物角度说明了庙湖湖区的污染程度严重。沉积物中不同磷形态在垂直方向上的分布变化规律复杂,其中 TP、不稳态磷(LP)、铝结合磷(Al-P)和 Fe-P 含量随深度增加而降低,在表层 0~10 cm 有富积现象。沉积物中 TP 含量与释放潜力较大的 3 种磷形态 Al-P ($r^2=0.83$)、LP ($r^2=0.84$)和 Fe-P ($r^2=0.59$)含量呈显著正相关 ($P<0.0001$),说明目前湖底沉积物中相当一部分磷是活性较大的磷,它可能成为水体营养物质的重要来源,造成持续的湖泊富营养化问题。

关键词: 东湖; 磷形态; 上覆水; 沉积物; 富营养化

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2005)06-1152-05

Phosphorus Fractions and Vertical Profiles in Sediment Core and Overlying Water of Donghu Lake

LIN Yue-juan¹, WU Feng¹, DENG Nan-sheng¹, FANG Tao², LIU Jian-tong²

(1. College of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: High phosphorus concentrations due to internal loading from the sediment with a strongly negative impact on lake water quality, is often seen in shallow urban lakes after a reduction of external loading. For a better understanding of the phosphorus dynamics, sequential chemical extraction techniques were used to study sediment P-pools distribution and relative importance in a eutrophicated shallow urban lake, Donghu Lake. We analyzed phosphorus concentrations in sediment cores and overlying water in spring and summer, respectively. The mean TP was 1.11 mg·L⁻¹ in spring and 1.25 mg·L⁻¹ in summer, indicating that Donghu Lake was at the state of hyper-eutrophication. The particle phosphorus was the dominant form in spring, while dissolvable phosphate (DP) became the dominant one in summer. The iron bound P (Fe-P) and occluded P (OcP) were the dominant fractions in sediment. Vertical profiles showed that TP, LP, Al-P and Fe-P were characterized by a similar distribution pattern and enrichment in the upper 0~10cm sediment layers. There were significantly positive correlations between TP and Al-P ($r^2=0.83$), LP ($r^2=0.84$) and Fe-P ($r^2=0.59$). Since these three fractions of phosphorus were active ones and had high P availability, they might become the significant potential sources of P internal loading and caused persistent lake eutrophication.

Keywords: Donghu Lake; phosphorus fractionation; overlying water; sediment; eutrophication

武汉的东湖(30°33'N, 114°23'E)是长江中下游重

要的城市中型浅水湖泊,具有供水、旅游、养殖等多种功能。它由 9 个湖区组成,总面积为 33 km²,常年水深 2.21 m,湖水不存在跃温层,上下温差小,年均水温 18.6 ℃。湖底主要为重粘土和腐质泥,平均厚度 0.5 m。随着城市人口的增加和工农业的发展,沿湖大量未

收稿日期:2005-03-09

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2002CB4123)

作者简介:林悦涓(1980—),女,在读硕士。

联系人:刘建彤 E-mail:jtdliu@ihb.ac.cn

经处理的城市污水长期超标排入湖中,东湖水质在近二三十年迅速恶化^[1],特别在水果湖、庙湖等西南湖区水域水体污染最为严重^[2],大量营养盐沉积于湖底沉积物中^[3]。在外源污染得到控制后,湖水和沉积物的性质与营养盐内源释放的强度和持续时间之间的关系对于湖泊富营养化有着重要影响^[4]。近年来,国内对湖泊沉积物营养盐的空间分布及其形态分析已有较多的研究^[5-8],而以浅水湖泊为考察对象,同时考虑不同形态磷的剖面分布及其季节性变化则未见报道。

本文对2004年春、夏两季的东湖上覆水和柱状沉积物中磷的赋存形态和含量特征进行了分析。为进一步理解重污染湖区水-沉积物界面上营养元素各种形态迁移和转换过程提供了基础资料,也为研究城市浅水型富营养化湖泊沉积物作为内污染源对水质的影响提供科学依据,对科学治理城市浅水型湖泊富营养化的实践具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品的采集和制备

用湖泊沉积物-水界面柱状采样装置分别于2004年的4月和6月在东湖西南部的庙湖湖区4个样点采集沉积物柱芯和上覆水样品,见图1中A、B、C和D所示。沉积物柱芯在现场按2 cm间隔分截,样品用聚乙烯袋分装密封。用虹吸法吸取采样装置内的上覆水,现场加 H_2SO_4 调节 $\text{pH}<2$,带回实验室后冷藏保存;沉积物样品在室内自然风干,研磨后过100目筛。

1.2 样品的分析

水样中总磷(TP)、溶解性总磷(TDP)和溶解性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)的分析参照《水和废水监测分析方法》^[9]。

沉积物中总磷(TP)、不稳态磷(LP)、铝结合磷(Al-P)、铁结合磷(Fe-P)、钙结合磷(Ca-P)、闭蓄磷

(OcP)和有机磷(org-P)的测定,参考《湖泊富营养化调查规范(第二版)》^[10]。

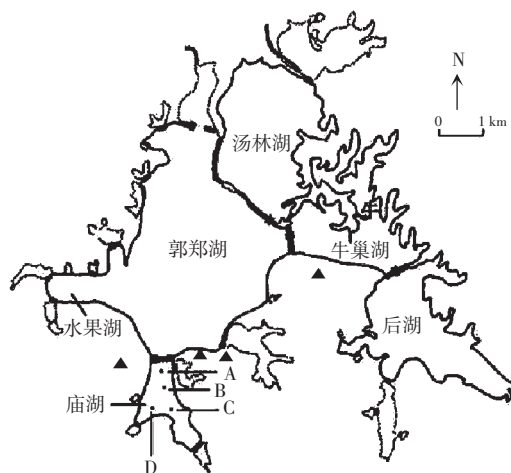


图1 研究区域和采样点

Figure 1 Sampling sites and the studied area of Donghu Lake

2 结果与讨论

2.1 上覆水中各种磷形态的含量和分布

如图2所示,春季湖水总磷(TP)的含量为 $1.14\sim 1.52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $1.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于国家标准近6倍,已属极富营养化水体^[11]。其中溶解性总磷(TDP)占TP的13.60%,溶解性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)只占TP的4.64%。由此可知,春季湖水中的磷主要以颗粒态形式存在。

夏季湖水TP含量为 $0.87\sim 1.56\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $1.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。TDP占TP的比例上升为71.17%, $\text{PO}_4\text{-P}$ 占TP的59.46%。这种变化可能是因为在夏季微生物、藻类和其他水生生物活动显著增加,使水体pH值升高,溶解氧的渗透深度减小,沉积物处于弱还原环境导致沉积物中的磷产生释放,以无机态磷酸盐的

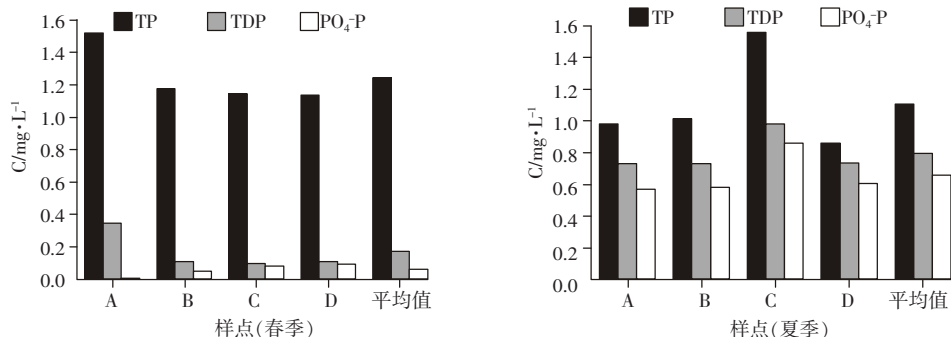


图2 春、夏两季东湖上覆水各种磷形态含量

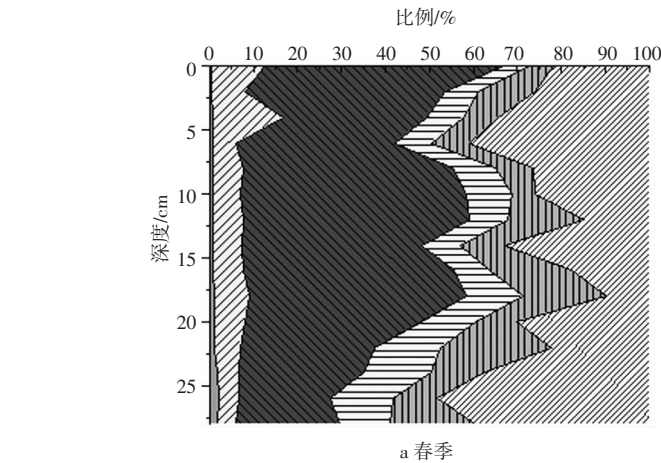
Figure 2 Concentrations of different forms of phosphorus in overlying water in spring and summer

形式进入水体。有机磷在微生物的作用下也可以转化为无机磷释放出去^[12],而藻类和其他水生植物的生长繁殖同化吸收了大量的磷,因此水体中 TP 的浓度并未升高。

2.2 沉积物中各种磷形态的变化

2.2.1 沉积物中各种磷形态的季节性变化

图 3 给出了春、夏两季沉积物中各种磷形态比例的剖面分布图。春季湖区沉积物中 Fe-P 比例最大,



占总磷的 44.3%, 夏季闭蓄磷 (OcP) 比例最大,占 36.3%。其中,Fe-P 作为沉积物污染的一个指征^[13],也从沉积物角度说明庙湖湖区属重污染湖区。大部分磷形态比例在两个季节的变化趋势类似,Al-P 和 Fe-P 的比例随深度增加而减少,Ca-P 和 OcP 的比例随深度增加而增大,这种变化规律基本与前人所作的研究一致^[14]。

夏季与春季相比,Al-P 的比例有所增加, Ca-P

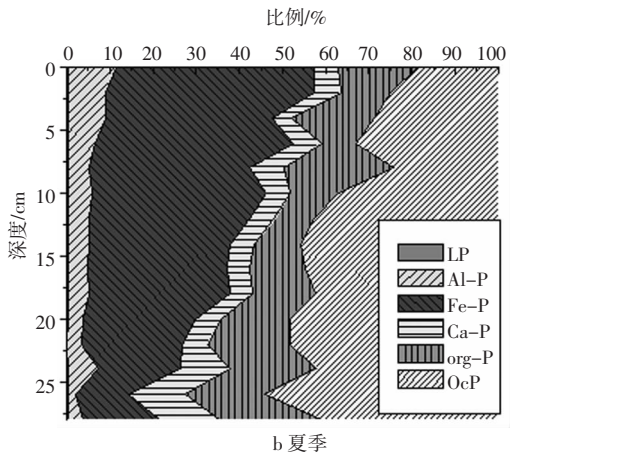


图 3 春、夏两季东湖沉积物各种磷形态比例的剖面分布
Figure 3 Section distribution of different forms of P in sediment of Donghu Lake in spring and summer

的比例稍有减少,而 LP 所占的比例明显降低。虽然 LP 比例最小,但却是沉积物首先释出的部分,很容易被藻类利用,因此值得关注。由于 Al-P 在氧化还原环境改变的情况下可以转化为可溶性磷进入水体,其比例改变会影响到藻的生长。OcP 比例随深度增加而增大的趋势和 Fe-P 随深度增加而减小的趋势在夏季表现得更加明显,因为释放活性较大的 Fe-P、Al-P 和 LP 在表层的比例增加,夏季磷的释放潜力明显增大。由于春、夏季总磷含量变化不大,所以这部分活性磷有可能由同层其他形态磷的转化得来,但更多的应该通过下层磷的上移得到补充。由于磷形态的这种转化性和迁移性,沉积在湖底的磷作为重要的潜在释放源将在相当长的时间内影响湖水的富营养化进程,造成水体富营养化水平很难在短期内降低。

2.2.2 沉积物中各种磷形态与总磷的相关性分析

由表 1 可知,在高显著性水平下 ($P<0.0001$),TP 和 LP、Al-P 的相关性超过 0.8,与 Fe-P 的相关性 ($r^2=0.59$) 也比较高。可见,释放潜力较大的 LP、Al-P 和 Fe-P 是影响总磷含量的主要因素。

2.2.3 沉积物中各种磷形态的垂直分布特征

图 4 为夏季沉积物中不同磷形态含量的剖面分

表 1 各种磷形态对总磷作相关性分析 ($N=55, P<0.0001$)
Table 1 The correlation analysis between TP and P-fraction ($N=55, P<0.0001$)

P	Al-P	Ca-P	LP	Fe-P	OcP	OrgP
a	-10.578 8	33.067 3	-0.580 0	31.836 4	206.638 1	45.084 9
b	0.096 83	0.031 7	0.004 36	0.411 1	0.150 3	0.123 5
r^2	0.826 1	0.274 47	0.836 49	0.586 14	0.098 91	0.355 81

布。对沉积物柱状样的分析表明,磷的不同化学形态在垂直方向的分布存在明显的差异:

TP 在 0~30 cm 的深度范围内含量分布在 138.4~2703 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均为 685 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;LP 在 0.31~11.03 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间分布,平均为 2.46 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;Al-P 变化范围在 7.74~274.73 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均为 56.03 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;Fe-P 在 22.26~1 282.54 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均为 310.57 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。这四种磷形态的变化趋势较相似,在 0~10 cm 范围内随深度增加含量迅速下降,大于 10 cm 后递减幅度减弱。其中 TP 在 0~10 cm 阶段含量下降幅度达 78.22%。湖泊总磷的这种表层富积现象可能与近年来大量含磷物质的输入累积于沉积物中有关,也可能是受早期成岩改造作用的结果。

A、B 两点的 Al-P 在 2~10 cm 间变化趋势相近,

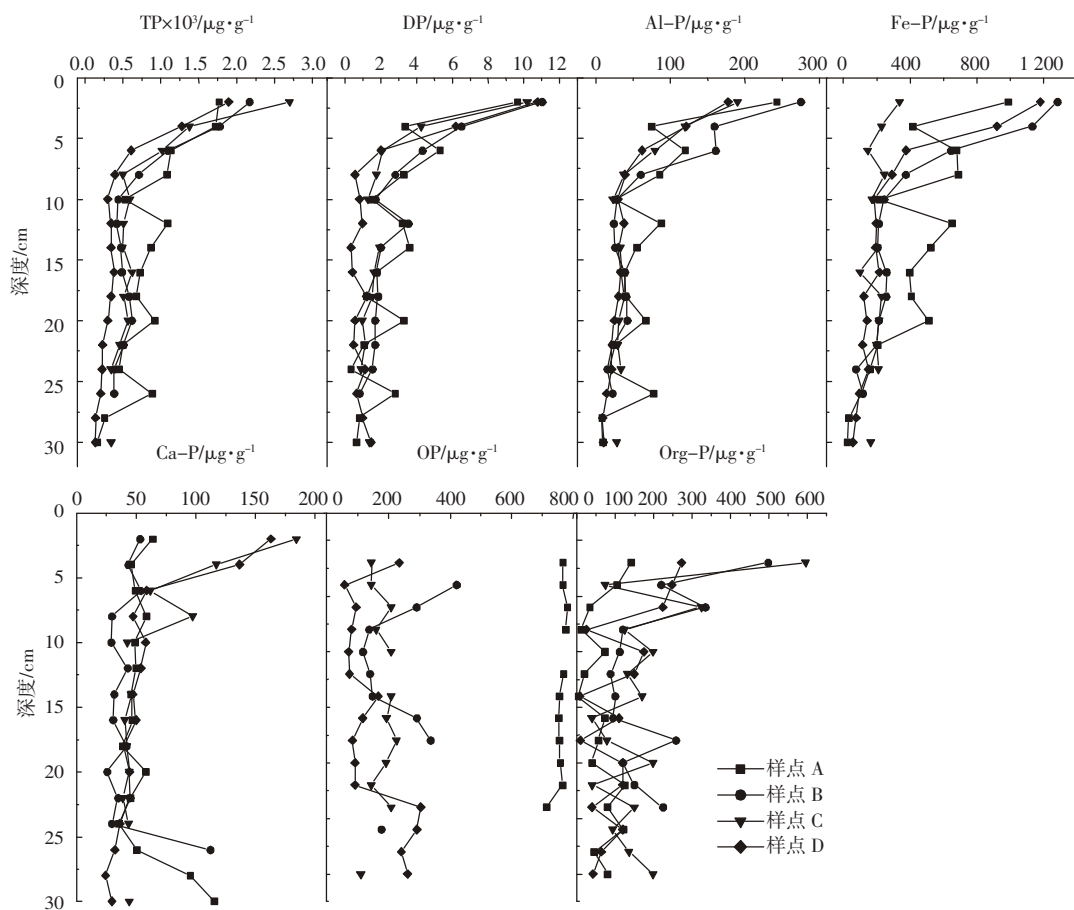


图4 东湖沉积物各种磷形态含量剖面分布图

Figure 4 Depth distribution of the content of different forms of P in the sediment cores in summer

都是先下降,再上升,又迅速下降。10 cm 后 B 点随深度的增加和缓地升高,20 cm 处达到峰值后随深度增加逐渐减小,而 A 点在大于 10 cm 的深度范围内有起伏明显的下降趋势。相对于 A、B 两点,C 和 D 的 Al-P 递减较平稳。对于 Fe-P 而言,C 点的 Fe-P 垂向减小幅度不大;A 点 Fe-P 虽整体有下降趋势,但变化起伏强烈,直到 22 cm 之后才出现平稳的递减趋势。

Ca-P 含量的变化范围在 $24.12 \sim 184.54 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均为 $56.08 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。C、D 两点与总磷的变化趋势相似;A、B 的变化趋势则与之相异,它们在 0~24 cm 之内的垂向变化不明显,大于 24 cm 后 Ca-P 含量迅速增加,这可能与沉积作用有关。

上述各采样点磷形态分布的差异性,主要与采样点所处地理位置有关。A 点处于庙湖与郭郑湖相接的桥洞附近,受水流、风流的影响大,沉积物的性质与其他采样点相差较大,而 B 点附近有开垦的农田,受人类活动干扰较大。C、D 两点处于湖中开阔地带,受到的各种干扰相对较少。

闭蓄磷(OcP)被认为是生物难以利用的磷。A 点

OcP 含量明显高于其他各点,平均为 $758.95 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;其他三点 OcP 的含量在 $70.78 \sim 335.78 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,垂向分布没有规律。有机磷(Org-P)平均为 $131.72 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占总磷的 19.23%,虽然总体呈下降趋势,但在 $70.24 \sim 377.30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的范围内变化起伏明显。

3 结论

(1) 武汉东湖的庙湖湖区水体富营养化程度严重,春季水体总磷含量为 $1.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,夏季为 $1.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均超过国家标准近 6 倍。春季湖水中磷主要以颗粒态形式存在,夏季主要以溶解态形式存在。

(2) 东湖沉积物中磷的赋存形态以无机态的铁磷和闭蓄磷为主。

(3) 相关性分析显示,铝磷、可交换磷和铁磷与总磷含量呈显著正相关。由于目前湖底沉积物中相当一部分磷是活动性较强的磷,它可能成为水体营养盐的重要来源,造成持续的湖泊富营养化问题。

(4) 由于受沉积环境早期成岩作用和人类活动等多种因素的共同作用,不同位置磷形态的垂直变化存

在显著差异。总体而言,TP、LP、Al-P 和 Fe-P 含量随深度增加而减少,在 0~10 cm 范围内有明显的富积现象。C、D 两点 Ca-P 的变化趋势与 TP 相似,而 A、B 两点的 Ca-P 受沉积作用影响,含量随深度增加而增加。OcP 和 org-P 的垂直变化复杂,规律性较差。

参考文献:

[1] 沈晓鲤. 武汉东湖的生态环境变迁与恢复问题[J]. 环境科学与技术, 2003, 26 (4): 24.

[2] 程晓如, 陈永祥, 方正. 武汉东湖西南区外源污染调查与评价[J]. 环境科学与技术, 2001, 96 (4): 40.

[3] Tang H, Xie P. Nitrogen and phosphorus of Lake Donghu[J]. Acta Hydrobiol Sinica, 1999 ,23 (Suppl) :1-7.

[4] Martin Sondergaard, Jens Peder Jensen & Erik Jeppesen. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes[J]. Hydrobiologia, 1999, 408/409:145-152.

[5] 朱广伟. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3) :381-388.

[6] 黄清辉, 王东红, 王春霞. 沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系

[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 583-586.

[7] 夏学惠. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境影响[J]. 沉积学报, 2002, 20 (3).

[8] 王雨春, 马梅, 万国江. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 22-28.

[9] 国家环保局. 水和废水监测分析方法(第三版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1989. 280-285.

[10] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版) [M].北京:中国环境科学出版社,1990.

[11] GB3838-2002,地表水环境质量标准[S].

[12] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 浅水湖泊沉积物磷释放的重要因子——铁和水动力[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22 (6): 762-764.

[13] Ruban V, Lopez-Sanchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments - A synthesis of recent works[J]. Fresenius J Anal Chem, 2001, 370: 224-228.

[14] Uwe Selig. Particle size-related phosphate binding and P-release at the sediment-water interface in a shallow German lake[J].Hydrobiologia, 2003, 492: 107-118.